

Artigo

# Estimación Temporal y Espacial de las Sequías e Inundaciones Meteorológicas con Índice China-Z en la Intercuenca Alto Apurímac, Perú

Odilon Correa Cuba<sup>1</sup> , Rosa Gabriela Coral Surco<sup>2</sup> <sup>1</sup>*Departamento Académico de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional José María Arguedas, Apurímac, Perú.*<sup>2</sup>*Departamento Académico de Contabilidad, Facultad de Ciencias Jurídicas, Contables y Sociales, Universidad Tecnológica de los Andes, Apurímac, Perú.*

Recibido em: 16 de Febrero de 2021 - Aceptado em: 2 de Febrero de 2022

## Resumen

La Intercuenca Alto Apurímac (IAA) está ubicada en la sierra sur de los Andes peruanos, en la cabecera de la cuenca amazónica. Este estudio se enfocó en evaluar la distribución espacial y temporal de las sequías e inundaciones meteorológicas a través de la aplicación del método del Índice China-Z (CZI) para el periodo 1986-2015, utilizando datos de precipitación observada y del satélite Tropical Rainfall Measuring Missions (TRMM). Los resultados revelaron que la serie de datos observados y de los datos obtenidos del satélite TRMM presentan características estadísticas similares, suficientemente robustas como para representar información pluviométrica. Así, a través de CZI se logró identificar y clasificar las clases de sequías e inundaciones a nivel temporal y espacial, concluyendo que en su mayoría las sequías se presentaron en el mes de diciembre, hacia la zona del oeste de la IAA, siendo los años críticos entre 1988-1992; mientras que las inundaciones ocurrieron con mayor frecuencia en el mes de febrero, hacia la franja este de la IAA, siendo 2011 y 2012 años excepcionales. Así, la investigación mostró que la aplicación de CZI es eficaz para detectar y clasificar sequías e inundaciones para los Andes sudamericanos.

**Palabras-clave:** Andes Peruanos, distribución, frecuencia, precipitación, TRMM.

## Temporal and Spatial Estimation of Meteorological Droughts and Floods with China-Z Index in the Alto Apurimac Interbasin, Peru

### Abstract

The Alto Apurimac Interbasin (IAA) is located in southern highlands at the headwaters of the Amazon basin of the Peruvian Andes. This study focused on evaluating the spatial and temporal distribution of meteorological droughts and floods through the China-Z Index (CZI) method for the period 1986-2015, using observed precipitation and Tropical Rainfall Measuring Missions (TRMM) satellite data. The results revealed that the observed data and data obtained from the TRMM satellite present similar statistical characteristics, which represent pluviometric robust information. Thus, through CZI it was possible to identify and classify the types of droughts and floods at a temporal and spatial level. Concluding that the most droughts occurred in december towards the western area on IAA with critical years between 1988-1992 while floods occurred more frequently in february towards the eastern fringe on IAA with 2011 and 2012 were exceptional years. Thus, the research showed that the application of CZI is effective in order to detect and classify droughts and floods for the South American Andes.

**Keywords:** Peruvian Andes, distribution, frequency, precipitation, TRMM.

## 1. Introducción

Anualmente, las sequías y las inundaciones afectan regiones enteras y a numerosas familias a nivel mundial y regional, ocasionando pérdidas económicas, daños ambientales y problemas sociales en muchos casos irre-

versibles. El (IPCC, 2021) pone en manifiesto, que el incremento de la temperatura media global en 1.5 °C, ocasiona fuertes precipitaciones y las inundaciones mayormente en África, Asia, América del Norte y Europa,

además, se proyectan sequías agrícolas, ecológicas y meteorológicas con mayor frecuencia en algunas regiones de todos los continentes. Como fenómeno climático natural, las sequías aún no están entendidas enteramente, pues su monitoreo y su pronóstico a nivel mundial y regional siguen siendo complejos. Como fenómenos naturales, las sequías son clasificadas en meteorológicas, agrícolas, hidrológicas y socioeconómicas. Las sequías meteorológicas consisten en la ausencia extensa de las precipitaciones menores a la media (Valiente, 2001) para un periodo de tiempo concreto. El análisis temporal y espacial de las sequías es vital para la mitigación de los desastres naturales, teniendo en cuenta que el impacto que provocan anualmente es severo en los sectores socioeconómicos, en particular en el área agrícola (Wang *et al.*, 2014a). Así, se puede ver que hay regiones en la parte norte de China sensibles a los impactos del cambio climático, donde los análisis espacio-temporales proporcionan directrices para adaptación y mitigación de dichos impactos, así como fortalecer las prácticas de gestión del riesgo de desastres naturales, medidas efectivas en la defensa y prevención de las sequías para los agricultores e impactos en la industria y energía, así como prevención de mayores problemáticas en la sociedad civil en general (Wang *et al.*, 2014a).

En Sudamérica, sobre los Andes Centrales, hay una circulación anticiclónica de alta troposfera a 200hPa llamada La Alta de Bolivia que ocurre durante el verano austral; las alteraciones de la velocidad y dirección de los vientos en el sector norte y sur producidas por La Alta de Bolivia pueden influir en el descenso de precipitaciones, principalmente en la sierra sur de Perú, norte de Chile, suroeste de Bolivia y la Amazonía (Barreto, 2016). Por otro lado, los patrones hidrológicos de la zona central de los Andes sudamericanos tienen una significativa oscilación decadal e interdecadal que controlan la variabilidad hidroclimática del territorio sur peruano, el oeste boliviano y el norte chileno (Segura *et al.*, 2016). En Sudamérica, algunas regiones fueron afectadas por tiempos prolongados por eventos hidrometeorológicos extremos, como sequías e inundaciones de distintos grados, causando catástrofes con severos impactos económico y sociales, como lo acontecido en la provincia de Buenos Aires (Scarpato *et al.*, 2013). En los Andes Centrales, la variabilidad decadal e interdecadal de las precipitaciones está condicionada por anomalías del Pacífico Tropical Centro-Occidental, como el fenómeno de El Niño, que juega un papel relevante en la modulación de la variabilidad de las precipitaciones (Segura *et al.*, 2016; Lavado *et al.*, 2014). Asimismo, otra fuente importante que regula el clima de los Andes sudamericanos es la Amazonía (Segura *et al.*, 2020). Las anomalías de las temperaturas superficiales del Pacífico, como la migración de la zona de convergencia intertropical, tienen relación directa con la presencia de las precipitaciones y anomalías sobre los Andes Centrales, producto de ello se ha evidenciado presencia de lluvias

acompañadas de inundaciones en algunas zonas del sur peruano y norte de Bolivia (Espinoza *et al.*, 2014).

Existen distintos índices para la cuantificación de la intensidad, duración y extensión espacial de las sequías (Wu *et al.*, 2001). Una de las técnicas de uso frecuente para monitorear el estado de sequías y periodos húmedos es el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), que permite hacer un seguimiento a las sequías meteorológicas analizando los déficits de precipitación en un amplio espectro de escalas de tiempo de 1 a 72 meses a través de un cálculo simple (Zhao *et al.*, 2021), además puede identificar tipos de sequías. Por otra parte, Palmer en los años sesenta desarrolló varios índices (PDSI, PDI, PHDI, ZINX), entre estos destaca el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI). Al compararse el SPI con el PDSI, el primero tiene una capacidad de respuesta que permite calcular periodos secos y húmedos a escala de tiempo de hasta 3 meses, mientras que el PDSI tiene una escala de tiempo de respuesta de entre 8 a 12 meses, a pesar de presentar esta desventaja, agregando otra variable como la humedad del suelo, el índice PDSI proporciona algunas indicaciones sobre sequías agrícolas (Burke, 2008). De otro lado, el Índice Estandarizado de Precipitación y Evaporación (SPEI) requiere de las variables de la precipitación y la evapotranspiración; SPEI puede determinar los cambios de sensibilidad de la evapotranspiración y la naturaleza multitemporal del SPI (Peña *et al.*, 2016), y SPEI y SPI tienen evolución temporal similar, lo que permite cuantificar los indicadores de las condiciones secas y húmedas. Asimismo, existen otras técnicas no comunes como el Índice China-Z (CZI) que permite monitorear las sequías e inundaciones espacio-temporales y el Z-Score estadístico que puede monitorear las sequías en diferentes escalas de tiempo. El CZI es relativamente más manejable, frente al SPI y otras técnicas, debido que tan solo depende de la variable precipitación para la clasificación de las sequías e inundaciones. Asimismo, la técnica CZI funciona en regiones donde hay registros meteorológicos escasos e incompletos (Wu *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2013).

Estudios sobre uso de la información del satélite Tropical Rainfall Measuring Missions (TRMM) ponen en evidencia que los datos de la precipitación son robustos, coinciden con series de datos observados a través de las estaciones meteorológicas, suficientes para el monitoreo temporal y espacial de las sequías e inundaciones donde no existen registros climáticos, siendo los datos satelitales una oportunidad para complementar y permitir el desarrollo de aplicaciones múltiples (Li *et al.*, 2013). Del mismo modo, la información del satélite TRMM ofrece una gran posibilidad de acceder a datos de precipitación para los Andes peruanos, constituido de áreas geográficas donde hay escasas estaciones meteorológicas, debido que tiene buena concordancia con los datos observados de la precipitación (Mantas *et al.*, 2015) a nivel regional. Otro

estudio, realizado por Rau-Condom, sobre la estimación espacial y temporal de la precipitación sobre los Andes peruanos con los datos mensuales, muestra confiabilidad de la data del satélite TRMM para los valores anuales (Rau-Condom, 2010). Cabe señalar que para el fortalecimiento de la gestión de los recursos hídricos en la zona altoandina, la información del satélite TRMM muestra una buena eficiencia (Lujano *et al.*, 2015).

Hoy en día, con el propósito de generar información sobre los impactos del cambio climático, diversas instituciones llevan realizando estudios al respecto en la Inter-cuenca Alto Apurímac (IAA). Una de estas fue el Programa de Adaptación al Cambio Climático (PACC), que se llevó a cabo entre 2009-2012, y que ofreció, entre otras investigaciones, un soporte técnico y científico para las políticas inmediatas de adaptación y mitigación ante el cambio climático a los Gobiernos regionales y locales. Una de sus conclusiones fue: “parte alta de las regiones de Cusco y Apurímac se caracteriza por condiciones climáticas extremas, con la presencia de sequías, heladas, lluvias intensas, temperaturas bajas extremas, entre otros” (Mora, 2012). En la recopilación de la información realizada por Mora (2012) se evidenció acontecimientos extremos de sequías prolongadas, que causó impactos socioeconómicos incalculables. Asimismo, hacia el este de la IAA, se registró la presencia de lluvias intensas que provocaron inundaciones y pérdidas económicas de hasta 184 millones de dólares (Lavado-Casimiro *et al.*, 2010).

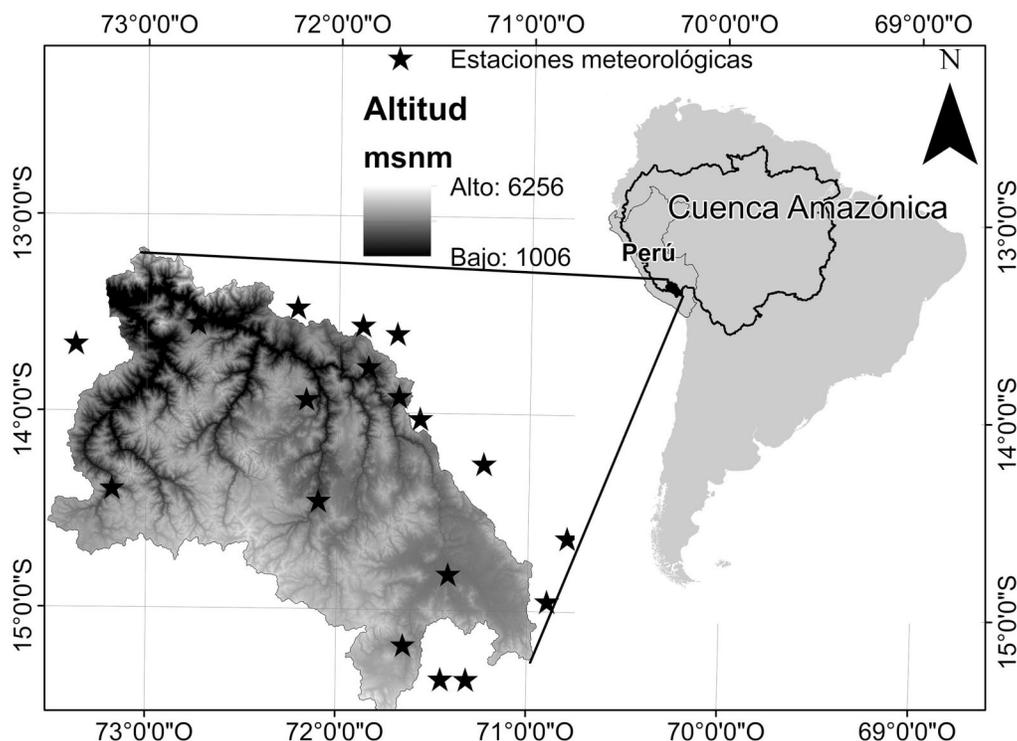
Las precipitaciones son estacionales y variables en los Andes peruanos, además hay escasa investigación sobre sequías e inundaciones, y la información meteorológica es insuficiente en la IAA. Todo ello motivó este estudio con el objetivo de analizar la distribución espacial y temporal de las sequías e inundaciones en la IAA para el periodo de 1986-2015, a través de datos observados y satelitales de la precipitación, utilizando como clasificador de sequías e inundaciones la técnica CZI.

## 2. Materiales y Método

### 2.1. Área del estudio

El estudio se realizó en la IAA, ubicada en el centro de la cordillera de los Andes sudamericanos y cabecera de la cuenca amazónica. Está localizada exactamente entre 13°10' a 15°30' latitud sur y 71°00' a 73°30' longitud oeste, en la sierra sur del Perú, tiene una población de más de 600 mil habitantes, cuenta con una superficie de 34 533,0 km<sup>2</sup> y una altitud sobre 1006 a 6256 m s. n. m. (Fig. 1). En la zona de la IAA, históricamente, se han registrado sequías prolongadas de hasta 2 años consecutivos y temperaturas extremas de hasta -12 °C en invierno (Mora, 2012).

Las principales actividades de los habitantes son la agricultura y la ganadería, directamente dependientes del periodo de lluvias; sin embargo, en los últimos años las



**Figura 1** - Ubicación geográfica de la Inter-cuenca Alto Apurímac y la distribución espacial de estaciones meteorológicas.

actividades mineras se han intensificado, ocasionando cambios socioeconómicos.

Hidrológicamente, la IAA limita, por el sur con las cuencas Ocoña y Camaná, ambas drenan hacia el Pacífico; por el norte con la Intercuenca Bajo Apurímac y parte de la cuenca Urubamba; por el oeste con la cuenca Pampas; y por el este con la cuenca Urubamba; los ríos de estas cuatro cuencas tributan hacia la cuenca amazónica. La geomorfología de la IAA se caracteriza por altas pendientes inconsistentes donde ocurren deslizamientos permanentes de rocas hacia los cauces de los ríos y llanuras. Hacia el centro y el norte tiene un relieve complejo donde se observa una fuerte erosión de los suelos marcados por altas pendientes, valles estrechos y profundos, esta erosión ha originado varios pisos ecológicos y diferentes microclimas; estas características hacen que sea considerada como una de las zonas más accidentadas del Perú.

## 2.2. Datos climáticos

La información meteorológica empleada en este estudio consiste en datos mensuales de la precipitación, procedentes de la red de 19 estaciones meteorológicas convencionales (Fig. 1) pertenecientes al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), ubicadas dentro y próximas a la IAA, de clima frígido y semiseco, para el periodo largo entre 1986-2015 [Tabla 1](#). Las estaciones fueron seleccionadas bajo el criterio de suficiente número de datos, también se seleccionó por conveniencia, debido a que son las únicas estaciones meteorológicas en esta parte del territorio. Además, no se ha tomado registro de estaciones lejanas debido a que los datos en los Andes difieren considerablemente pues las precipitaciones están condicionadas por la orografía. La información satelital TRMM pertenece a la NASA y fue descargada libremente para el periodo mediano entre 1998-2015 con una resolución de 0, 25°, que equivale a 27 km de lado.

## 2.3. Técnica CZI

En el estudio se empleó la técnica CZI, la cual está validada y recomendada por [Wu et al. \(2001\)](#); este modelo matemático opera respecto a la media: si la precipitación supera la media, el modelo automáticamente detecta el fenómeno como una inundación. De la misma forma, cuando la precipitación está por debajo de la normal, el fenómeno es detectado como sequía, de diferentes grados. CZI o Z se define:

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left( \frac{C_s}{2} \phi_i + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (1)$$

donde  $Z_i$  es el índice Z para la precipitación en el  $i$  mes,  $C_s = \frac{\sum (P_i - \bar{P})^3}{n\sigma^3}$  es el coeficiente de asimetría,  $\phi_i = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma}$  es la lluvia mensual estandarizada,  $P_i$  es la precipitación en

**Tabla 1** - Red de estaciones meteorológicas en la IAA

N°	Estaciones meteorológicas	Latitud (S)	Longitud (W)	Altitud (m s.n. m.)
1	Curahuasi	13°33'9"	72°44'6"	2737
2	Tambobamba	13°56'1"	72°10'1"	3317
3	Chalhuanca	14°23'34"	73°10'45"	3358
4	Cay cay	13°35'52"	77°41'44"	3150
5	Santotomas	14°27'0"	72°5'60"	3253
6	Andahuaylas	13°39'25"	73°22'15"	2933
7	Anta Ancachura	13°28'6"	72°12'57"	3340
8	Chilcayoe	13°52'1"	73°43'1"	3441
9	Paucaray	14°3'3"	73°38'38"	2943
10	Acomayo	13°55'1"	77°41'1"	3227
11	Paruro	13°46'3"	77°50'41"	3047
12	Yauri	14°49'0"	77°25'1"	3927
13	Granja Kayra	13°33'24"	77°52'30"	3219
14	Pomacanchi	14°1'41"	77°34'22"	3686
15	Sicuaní	14°15'13"	77°14'14"	3574
16	Santa Rosa	14°37'37"	76°47'47"	3940
17	Llally	14°56'55"	76°53'53"	4111
18	Porpera	15°21'1"	77°19'1"	4156
19	Tisco	15°21'1"	77°27'1"	4175

el mes  $i$ ,  $n$  es el total de meses,  $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (P_i - \bar{P})^2}$  y  $\bar{P} = \frac{1}{n} \sum P_i$  son el error estándar (mm) y media (mm) de precipitación en todo el mes. Con esta técnica CZI se categorizan las clases de sequías e inundaciones en severa, moderada, leve y normal. [Tabla 2](#) muestra los criterios de categorización.

## 2.4. Control de datos

Los datos de precipitación mensual, como única variable, pasaron por un riguroso control de calidad en la plataforma de datos HYDRACCESS, que consiste en la crítica, homogenización y completación de datos faltantes a través del Método del Vector Regional (MVR) Brunet-Moret de manera iterativa. Además, se tomaron las recomendaciones de [Espinoza \(2005\)](#) sobre tener alta correlación con el vector regional, mientras que la desviación estándar de las desviaciones debe ser muy próxima. Asi-

**Tabla 2** - Categorización del CZI.

N°	CZI	Categorización
1	$Z > 1.96$	Inundación severa
2	$1.44 < Z \leq 1.96$	Inundación moderada
3	$0.84 < Z \leq 1.44$	Inundación leve
4	$-0.84 \leq Z \leq 0.84$	Normal
5	$-1.44 \leq Z < -0.84$	Sequía leve
6	$-1.96 \leq Z < -1.44$	Sequía moderada
7	$Z < -1.96$	Sequía severa

mismo, se completaron datos faltantes, se detectaron y se eliminaron datos atípicos de muchas estaciones hasta encontrar alta correlación con el vector regional. Del mismo modo, se observó que las desviaciones estándar son semejantes y mínimas, las cuales reflejan la probabilidad de información climática confiable. La (Fig. 2) muestra el flujograma de la metodología utilizada en el estudio.

Con la ayuda del software TREND se procedió con las pruebas estadísticas, se eligió la prueba de la tendencia con el test de Mann-Kendall (no paramétrico) y para los cambios de media/mediana se usó la distribución Cusum (no paramétrico). Los test que se usaron para ver la diferencia en media/mediana en dos diferentes periodos son el Rank-Sum (no paramétrico) y el T-Student (paramétrico). Los resultados del test de Mann-Kendall mostraron alto nivel de confianza, no significativo (NS), libre de tendencia, el 89% del resultado del test se encuentra en NS. El test estadístico para cambio de media/mediana, hecho con la distribución de Cusum, muestra que el 90% de la serie de datos presenta un test NS. Con ello queda confirmada la estacionariedad de la serie de datos a lo largo de la IAA, con un nivel de confianza estadística de 95%.

### 3. Resultados y Discusión

En la IAA las precipitaciones se presentan desde el mes de noviembre a marzo conforme va migrando hacia el sur, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT); la

mayor descarga de la precipitación se da en los meses de enero y febrero con una media de 174 mm/mes para el periodo largo. En los meses de abril a octubre se ausentan las lluvias, por lo que es considerado como periodo seco o de estiaje. La (Fig. 3) muestra la estacionalidad de las precipitaciones a través de los datos observados en la IAA, este resultado tiene coincidencia con los análisis realizados por Rau-Condom (2010) y Zubieta *et al.* (2017), la estacionalidad unimodal de las precipitaciones es característico de los Andes peruanos. Además, se sabe que en el centro de los Andes sudamericanos, por encima de los 2000 m s. n. m., las precipitaciones no exceden de 1500 mm/año, y los periodos de lluvia y sequía están asociados con la migración estacional de la ZCIT (Espinoza *et al.*, 2014), mientras que en la IAA la precipitación máxima es de 1403,5 mm/año para el periodo de lluvias, esto indica la presencia de los Andes altera significativamente sobre las condiciones secas y húmedas.

Para el periodo de lluvias, las precipitaciones de mayor intensidad se distribuyeron hacia el centro de la IAA, sobre las provincias de Cotabambas y Paruro (casi en su totalidad), al norte de Chumbivilcas, oeste de Cusco y sur de Anta, que oscilan en el intervalo de 880 a 980 mm/año. Las bajas precipitaciones se determinaron al noroeste y sur de la IAA, alrededor de 640 a 740 mm/año, distribuidas hacia parte de las provincias de Abancay, Andahuaylas, La Convención, Chumbivilcas y Espinar.

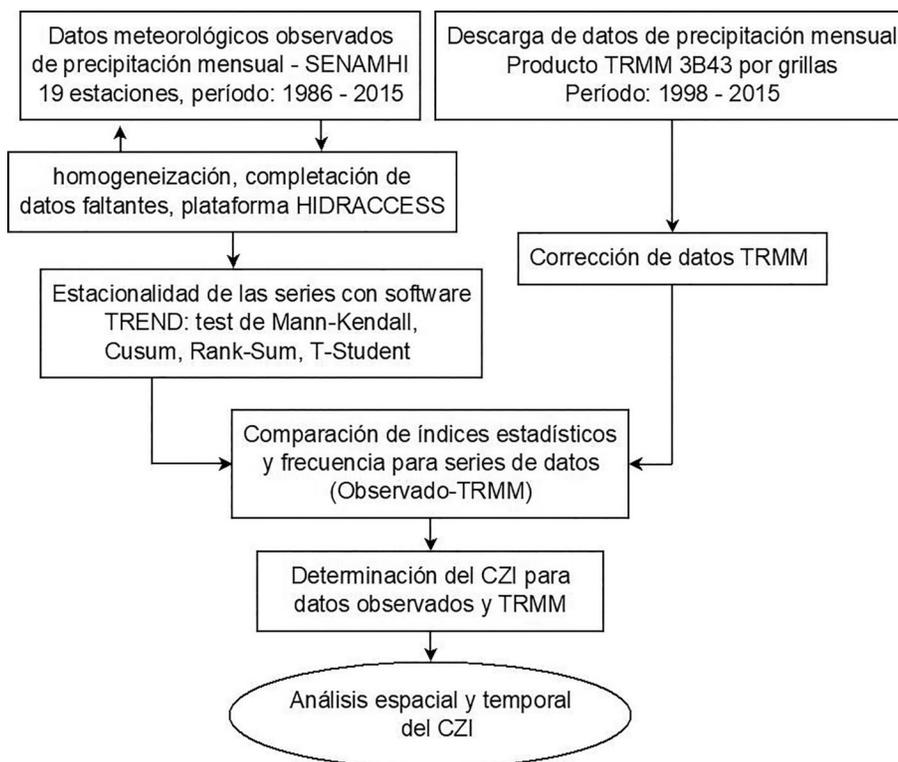
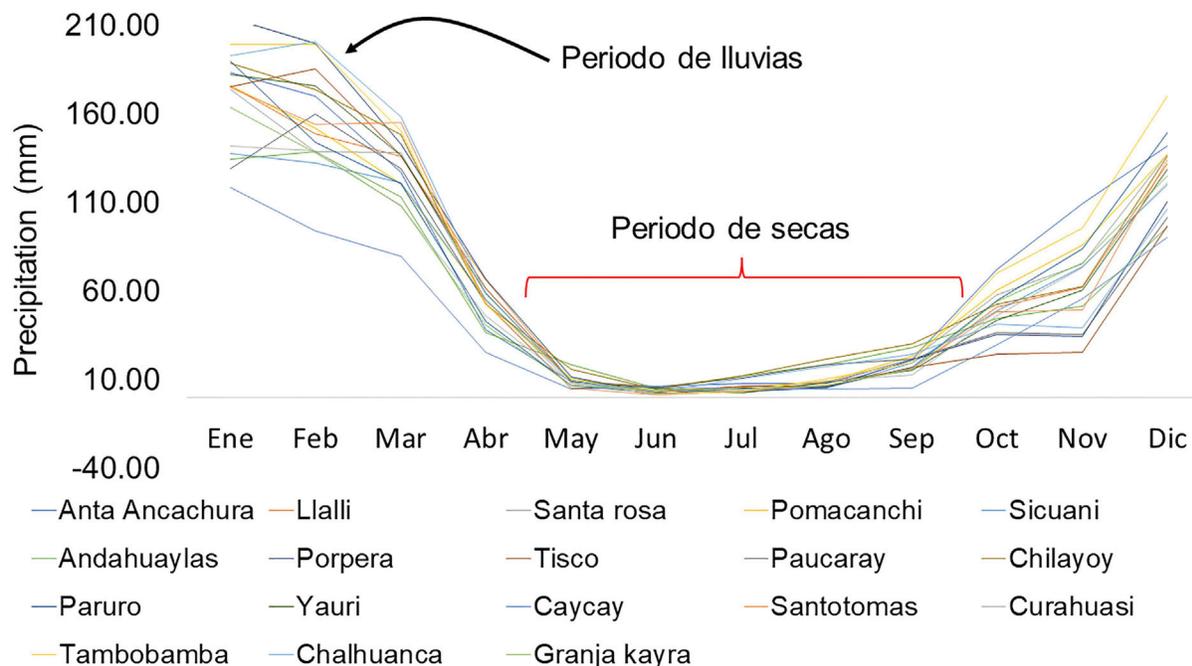


Figura 2 - Diagrama de flujo de la metodología.



**Figura 3** - Estacionalidad de la precipitación mensual observada para el periodo de 1986-2015.

En la (Fig. 4) se puede ver el diagrama de dispersión y la distribución de la frecuencia, el cual evidencia las características estadísticas similares para el periodo largo de datos observados, así como para el periodo mediano de datos observados y la información del satélite TRMM, este comportamiento de la dispersión y distribución en la IAA es análogo a los resultados obtenidos por Wang *et al.* (2014b), por lo que se sintetiza que los periodos largo y mediano no tienen diferencias significativas esenciales, así que la precipitación en la IAA para un periodo de 360 y 210 meses es significativo y además obedece a la distribución gamma, siendo suficiente para análisis temporal y espacial de sequías e inundaciones en la IAA u otra área de la región andina.

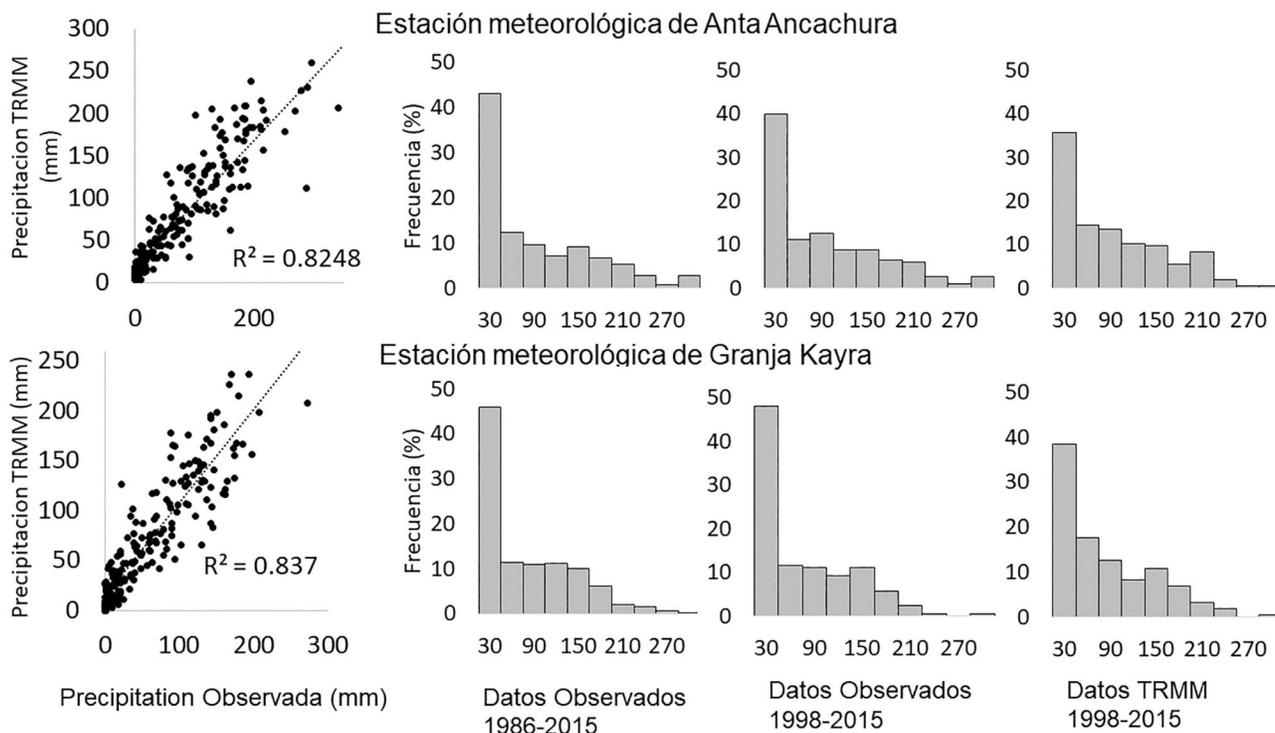
La distribución temporal de las sequías e inundaciones meteorológicas en la IAA, categorizado por la técnica CZI, comprende entre sequías e inundaciones de tipo leve, moderada y severa (ver Fig. 5 para serie larga observada).

Los años críticos de presencia de sequías con precipitación media de 500 mm/año fueron 1992, 1991, 1987, 1990 y 2014, este resultado tiene coincidencia con estudios realizados en la parte alta de las regiones de Apurímac y Cusco (ver Mora, 2012), donde también se destacan las sequías de estos años determinados por la técnica SPI. Por otro lado, las inundaciones detectadas con precipitación media anual de 1300 mm fueron 2012, 1997, 2001 y 2011, que tienen coincidencias con la presencia de los fenómenos de El Niño, por lo que las inundaciones detectadas de estos años tienen coincidencia con las inunda-

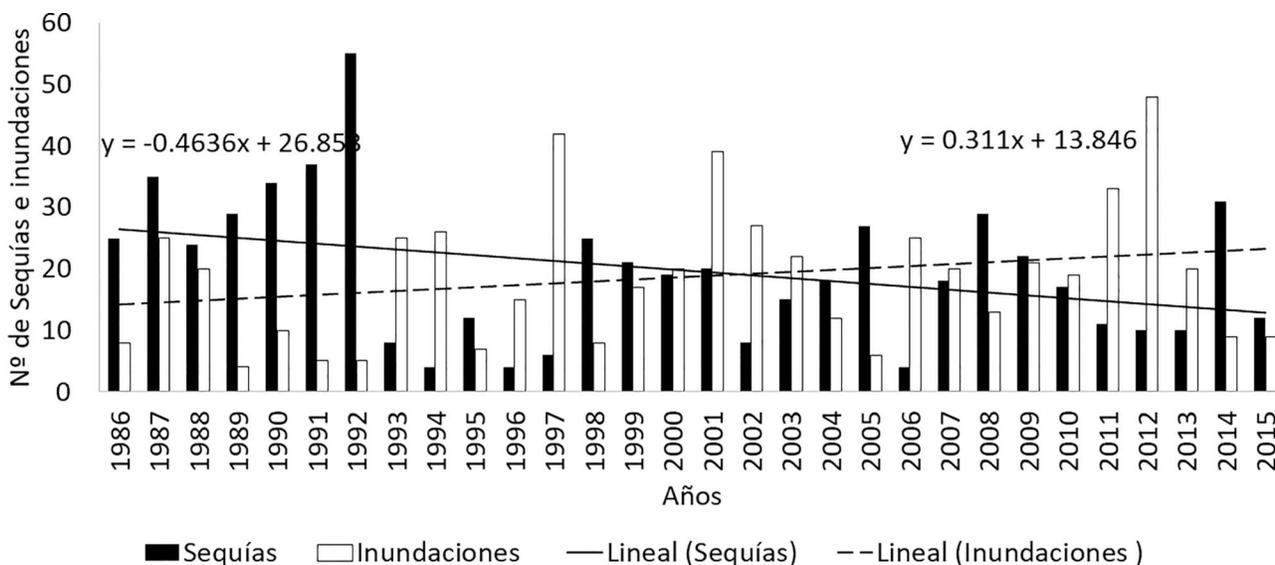
ciones ocurridas en Huacarpay (ver Lavado-Espinoza, 2014 y Mora, 2012). En la IAA también se dieron sequías e inundaciones consecutivas, se puede destacar las sequías entre los años 1988-1992, y las inundaciones de los años 2001 y 2002. De manera general, para el periodo largo estudiado, las sequías tienen tendencia a disminuir a razón de  $-0,5$  veces/año, y las inundaciones tienen tendencia a aumentar a razón de  $+0,3$  veces/año.

La presencia de sequías e inundaciones meteorológicas en la IAA presenta similar comportamiento a nivel espacial y temporal, exhiben comportamientos periódicos decadal e interdecadal, la (Fig. 6) muestra el CZI periódico para algunas estaciones, con presencia de algunas anomalías. De acuerdo a Segura *et al.* (2016), las precipitaciones en los Andes del sur peruano tienen un comportamiento periódico decadal e interdecadal; en este estudio se evidenció que las series temporales de las sequías e inundaciones tienen similar comportamiento interdecadal a las series temporales de las precipitaciones, debido a que la técnica CZI depende solo de la precipitación.

Las sequías severas con mayor frecuencia se revelaron en diciembre 1992, en las estaciones Sicuani, Yauri, Chilayoc, Chalhuanca y Anta Ancachura, donde las precipitaciones medias fueron de 37 mm/mes; por otro lado, las inundaciones severas se dieron mayormente en el mes de febrero (260 mm/mes) de los años 2012 y 2001, sobre todo hacia el sureste de la IAA; las tendencias fueron de  $-0.1$  y  $+0.1$  por año, respectivamente. De manera general, para el periodo largo estudiado, las sequías se presentan



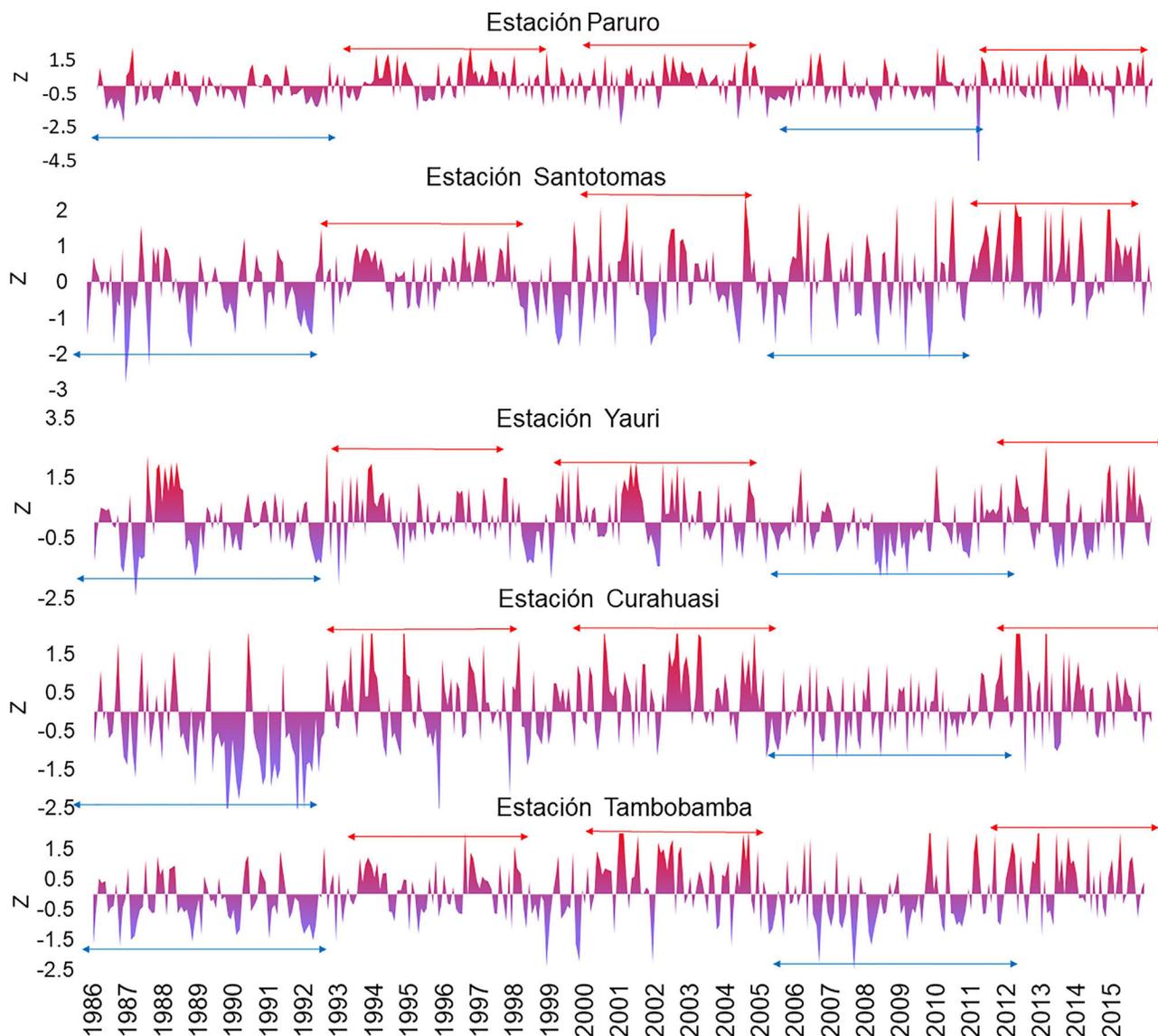
**Figura 4** - Diagrama de dispersión de precipitación mensual para el periodo mediano y comparación de frecuencias de histogramas para periodo largo y mediano, de datos observados y TRMM.



**Figura 5** - Distribución temporal de frecuencia interanual de sequías e inundaciones (leve, moderada y severa) para el periodo 1986-2015.

mayormente en los meses de noviembre y diciembre, mientras las inundaciones en el mes de febrero, coincidiendo con algunos resultados destacados en Mora (2012) para las provincias altas de Cusco y Apurímac. Excepcionalmente, el año 2012 tuvo una mayor frecuencia de lluvias en toda la Intercuenca, y en varias estaciones se comprobó presencia de inundaciones, de moderadas a severas, durante los meses de noviembre a marzo.

Se realizó la comparación del CZI para periodo mediano de las series de datos observados y de la información del satélite TRMM. En síntesis, muestra buena aproximación entre CZI observada y TRMM con coeficiente de correlación de Pearson 0,8. En algunos casos, ligeramente sobrestima y en otros subestima, a pesar que los datos de precipitación mensual TRMM fueron corregidos con un factor de modelo multiplicativo, análogo reali-



**Figura 6** - Sequías e inundaciones mensuales determinadas por CZI, para datos observados de algunas estaciones meteorológicas de la IAA, periodo 1986-2015.

zado por [Lujano et al. \(2015\)](#), sobre corrección de datos satelitales con respecto a datos observados.

En el caso de la distribución espacial, para cada mes del periodo lluvioso, los datos observados para el periodo largo revelan que en el mes de diciembre las precipitaciones mayormente se distribuyen hacia el centro y este de la Intercuenca; hacia el oeste y sur están los territorios denominados como provincias altas, las que presentan algunas veces ausencia de lluvias; en los meses de enero y febrero hay deficiencias en las precipitaciones hacia el norte y sur, las que apenas alcanzan una media de 100 mm/mes, ocasionando presencia de algunas sequías; mientras el centro presenta lluvias por encima de la media hasta 250 mm/mes, algunas veces causando inundaciones; en el mes de marzo las pre-

cipitaciones se distribuyeron de manera general en toda la Intercuenca. Según [Espinoza \(2008\)](#), el régimen pluviométrico hacia el centro de los Andes sudamericanos está condicionado por la presencia de los fenómenos de El Niño y La Niña, fenómenos naturales que suelen presentarse en el periodo lluvioso, condicionantes de las anomalías en la IAA que coinciden con la fase cálida de la Oscilación Decadal del Pacífico, similar efecto que ocurre en otras latitudes mencionado por ([Sarricolea et al., 2019](#)). Durante el fenómeno de El Niño, el norte de La Alta de Bolivia es afectado debido al levantamiento de aire húmedo hacia el Altiplano, debido a este flujo convectivo el sur de la IAA presenta algunas anomalías y que además forma parte del Altiplano; también, las características geográficas de la IAA condicionan la dis-

tribución espacial de las precipitaciones, zonas altas reciben mayor precipitación que las bajas.

En el caso de la distribución espacial de las sequías e inundaciones severas a través de CZI observadas y TRMM periodo mediano, al observar las Figs. 7 y 8, estas ilustran la comparación espacial de sequías e inundaciones severas, evidenciando la similitud con una correlación media de 0,8.

El incremento de la frecuencia y magnitud de las sequías e inundaciones son evidencia del cambio climático, por ejemplo, Anderson *et al.* (2012), en un estudio realizado sobre ecosistemas en los Andes tropicales, destacan que la magnitud de los indicadores del cambio climático en los Andes tropicales será una de las más dramáticas a nivel mundial, predicción basada en los modelos regionales. En este estudio, para el periodo de los 30 años analizados, se ha encontrado que sequías severas con mayor frecuencia (5 a 6 veces) se presentaron hacia las provincias de Aymaraes, Antabamba, Paruro y Acomayo,

estas provincias tiene un relieve más accidentado, donde las precipitaciones apenas alcanzaron una media de 550 mm anuales; mientras que las inundaciones severas con mayor frecuencia (5 y 6 veces) se determinaron hacia el centro de la IAA, en gran parte sobre las provincias de Abancay, Cotabambas, Cusco y Chumbivilcas, dichas provincias tienen un relieve relativamente plana, las precipitaciones alcanzaron hasta una media de 1020 mm anuales.

Las sequías e inundaciones a través de la técnica CZI Cuadro 2, se lograron detectar y clasificar en la IAA de los Andes sudamericanos, a través de series temporales de precipitación observada y TRMM, por ende, también a nivel espacial, su dependencia de tan sólo de la variable precipitación hace su simplicidad de cálculo para determinación de las sequías e inundaciones, considerándose técnica apropiado, que al mismo tiempo podría ser desventajoso por depender de tan solo de la variable precipitación, debido que el sistema termodinámico y

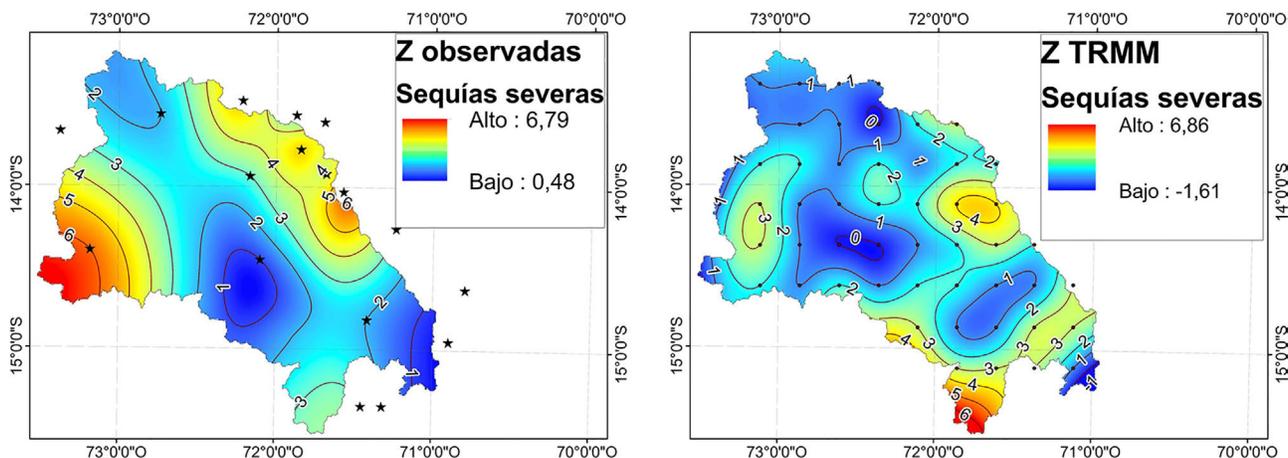


Figura 7 - Distribución espacial interanual de las sequías severas observadas (figura izquierda) período 1986 a 2015 y sequías severas TRMM (figura derecha) período 1998 a 2015, para la IAA.

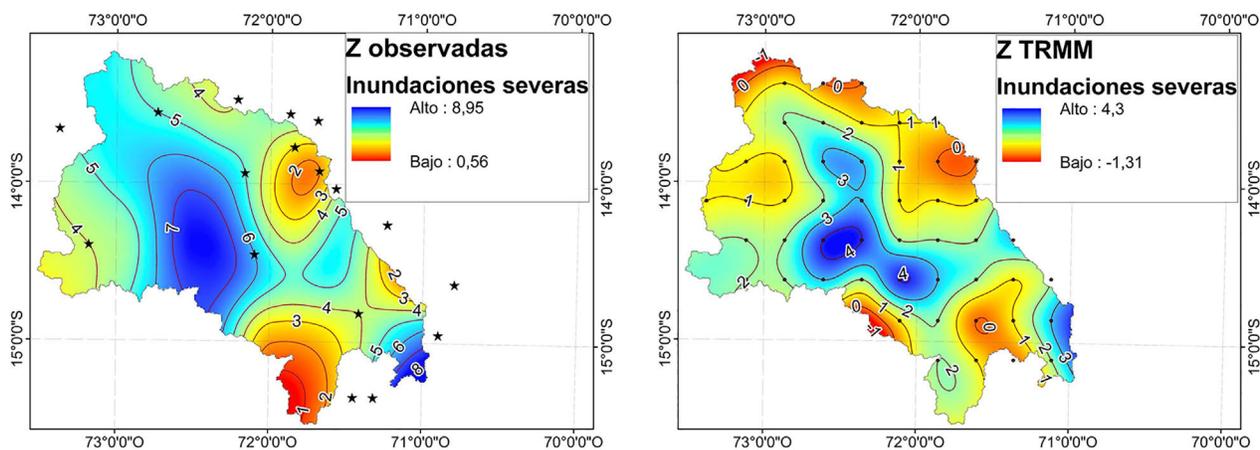


Figura 8 - Distribución espacial interanual de las inundaciones severas observadas (figura izquierda) período 1986 a 2015 y las inundaciones severas TRMM (figura derecha) período 1998 a 2015, para la IAA.

circulación atmosférica depende de varios elementos meteorológicos asociados entre sí, mientras CZI no depende de la temperatura y otros elementos, confiamos en nuestros resultados, debido que hay coincidencia con estudios anteriores sobre la presencia de sequías e inundaciones para algunos puntos de la IAA por ejemplo (Lavado-Espinoza, 2014 y Mora 2012), que también en (Wu *et al.*, 2001) se mostró alta correlación entre CZI, SPI y Z-Score. La circulación atmosférica convectiva sobre la IAA influye en la presencia de sequías e inundaciones, tiene mayor asociación con el fenómeno de El Niño, debido que este ocasiona anomalías en la circulación atmosférica, afecta al calentamiento de las altas latitudes y enfriamiento de las bajas latitudes tropicales, evidencia destacada por Vuille & Keimig (2004) para los Andes Centrales, con la salvedad que no siempre estas anomalías de los vientos se extienden.

#### 4. Conclusiones

En este estudio se demuestra que la técnica CZI identifica y clasifica las sequías e inundaciones de nivel leve, moderada y severa en un área de los Andes sudamericanos, haciendo uso de los datos de las precipitaciones observadas y de los datos del satélite TRMM mensuales para un período largo y mediano.

El resultado sugiere que los datos satelitales TRMM son una fuente útil y confiable para las zonas altoandinas, debido a que la serie de datos observados para las estaciones meteorológicas tiene características estadísticas similares coincidentes con la serie de datos TRMM; para periodo mediano, los datos TRMM son suficientemente robustos como para representar información pluviométrica.

Los resultados muestran que las sequías mayormente ocurren en el mes de diciembre hacia la zona del oeste de la IAA, siendo los años críticos entre 1988-1992; las inundaciones ocurren con mayor frecuencia en el mes de febrero, hacia la franja este de la IAA, siendo los años 2011 y 2012 excepcionales; las sequías y las inundaciones aparentan tener un comportamiento interdecadal similar a las precipitaciones.

Debido al alto grado de vulnerabilidad de los pobladores, en relación a la agricultura y la biodiversidad, así como los inminentes peligros climáticos en las zonas altoandinas, es necesario estudiar los factores condicionantes.

#### Referencias

ANDERSON, E.; MARENGO, J.; VILLALBA, R.; HALLOY, S.; YOUNG, B.; CORDERO, D.; GAST, F.; JAIMES, E.; RUIZ, D. Consecuencias del cambio climático en los ecosistemas y servicios ecosistémicos de los Andes Tropicales. In: **Climate Change and Biodiversity in the Tropical**

- Andes, Paris: Scientific Committee on Problems of the Environment, p. 426, 2012.
- BARRETO, C.W. **Comportamiento de La Alta de Bolivia Hacia Finales del Siglo XXI Bajo el Escenario de Emisión RCP8.5**. Tesis in Ingeniería in Meteorología, Universidad Nacional de la Molina, Lima, 2016.
- BURKE, E.J.; BROWN, S.J. Evaluating uncertainties in the projection of future drought. **Journal of Hydrometeorology**, v. 9, n. 2, p. 292-299, 2008.
- ESPINOZA, J.C. **El Método del Vector Regional de Índices Pluviométricos**. Curso taller: Utilización del método del Vector Regional con HYDRACCESS.: SENAMHI-Perú, 2005. Disponible en <https://dokumen.tips/documents/el-metodo-del-vector-regional-de-indices-pluviometricos.html>.
- ESPINOZA, J.C.; MARENGO, J.A.; RONCHAIL, J.; CARPIO, J.M.; FLORES, L.N.; GUYOT, J.L. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: The role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 12, p. 124007, 2014.
- ESPINOZA, J.C.; RONCHAIL, J.; LOUP, J.; COCHONNEAU, G.; NAZIANO, F.; LAVADO, W.; DE OLIVERA, E.; POMBOSA, R.; VAUCHEL, P. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 11, p. 1574-1594, 2009.
- IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2021. Disponible en [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report\\_smaller.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report_smaller.pdf).
- LAVADO-CASIMIRO, W.; ESPINOZA, J.C. Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 171-182, 2014.
- LAVADO-CASIMIRO, W.; SILVESTRE, E.; PULACHE, W. Tendencias en los extremos de lluvias cerca a la ciudad del Cusco y su relación con las inundaciones de enero del 2010. **Revista Peruana Geo-Atmosférica**, v. 2, p. 89-98, 2010.
- LI, X.; ZHANG, Q.; YE, X. Capabilities of satellite-based precipitation to estimate the spatiotemporal variation of flood/drought class in Poyang Lake basin. **Advances in Meteorology**, v. 2013, 901240, 2013.
- LUJANO, E.; FELIPE, O.G.; LUJANO, A.; QUISPE, J.P. Validación de la precipitación estimada por satélite TRMM y su aplicación en la modelación hidrológica del río Ramis Puno Perú. **Revista Investigaciones Altoandinas**, v. 17, n. 2, p. 221-228, 2015.
- MANTAS, V.M.; LIU, Z.; CARO, C.; PEREIRA, A.J.S.C. Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products in the Peruvian Andes. **Atmospheric Research**, v. 163, p. 132-145, 2015.
- MORA, A. **El Clima de Cusco y Apurímac está Cambiando: Resumen para Divulgación del Estudio “Caracterización Climática de las Regiones Cusco y Apurímac-SENAMHI”**, 2012. Disponible en [https://doc.rero.ch/record/306586/files/07-El\\_clima\\_de\\_cusco\\_y\\_apurimac\\_esta\\_cambiando.pdf](https://doc.rero.ch/record/306586/files/07-El_clima_de_cusco_y_apurimac_esta_cambiando.pdf), accedido el 20 de febrero de 2022.

- RAU, P.; CONDOM, T. Análisis espacio temporal de la precipitación en las zonas de montaña de Perú (1998-2007). **Revista Peruana Geo Atmosférica**, v. 29, n. 2, p. 16-29, 2010.
- SARRICOLEA, P.; MESEGUER-RUIZ, Ó.; SERRANO-NOTIVOLI, R.; SOTO, M.V.; MARTIN-VIDE, J. Trends of daily precipitation concentration in Central-Southern Chile. **Atmospheric Research**, v. 215, p. 85-98, 2019.
- SEGURA, H.; ESPINOZA, J.C.; JUNQUAS, C.; LEBEL, T.; VUILLE, M.; GARREAUD, R. Recent changes in the precipitation-driving processes over the southern tropical Andes/western Amazon. **Climate Dynamics**, v. 54, n. 5, p. 2613-2631, 2020.
- SEGURA, H.; ESPINOZA, J.C.; JUNQUAS, C.; TAKAHASHI, K. Evidencing decadal and interdecadal hydroclimatic variability over the Central Andes. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 9, p. 094016, 2016.
- VALIENTE, Ó.M. Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. **Investigaciones Geográficas**, n. 26, p. 59-80, 2001.
- VUILLE, M.; KEIMIG, F. Interannual variability of summertime convective cloudiness and precipitation in the central Andes derived from ISCCP-B3 data. **Journal of Climate**, v. 17, n. 17, p. 3334-3348, 2004.
- WANG, Q.; WU, J.; LEI, T.; HE, B.; WU, Z.; LIU, M.; MO, X.; GENG, G.; LI, X.; ZHOU, H.; LIU, D. Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale. **Quaternary International**, v. 349, p. 10-21, 2014a.
- WANG, X.; HOU, X.; LI, Z.; WANG, Y. Spatial and temporal characteristics of meteorological drought in Shandong Province, China, from 1961 to 2008. **Advances in Meteorology**, v. 2014, 873593, 2014b.
- WU, H.; HAYES, M.J.; WEISS, A.; HU, Q. An evolution of the standardized precipitation index, the China-Z index and the statistical Z-score. **International Journal of Climatology**, v. 21, n. 6, p. 745-758, 2001.
- ZHAO, R.; WANG, H.; CHEN, J.; FU, G.; ZHAN, C.; YANG, H. Quantitative analysis of nonlinear climate change impact on drought based on the standardized precipitation and evapotranspiration index. **Ecological Indicators**, v. 121, p. 107107, 2021.
- ZUBIETA, R.; SAAVEDRA, M.; SILVA, Y.; GIRÁLDEZ, L. Spatial analysis and temporal trends of daily precipitation concentration in the mantaro river basin: Central andes of peru. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 31, n. 6, p. 1305-1318, 2017.

### Internet Resources

GeoR Package, <https://cran.r-project.org/web/packages/geoR/index.html>.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.